

MÉMOIRES

DE L'UTILISATION DIRECTE

DES

GAZ DES HAUTS FOURNEAUX

POUR LA PRODUCTION DE LA FORCE MOTRICE

PAR

H. HUBERT

Ingénieur principal du Corps des Mines, chargé de cours
à l'Université de Liège

[6691 : 62143]

Autrefois, les gaz sortant des hauts fourneaux s'échappaient librement dans l'air où ils brûlaient en arrivant au contact de l'oxygène et produisaient une flamme immense qui illuminait tout le voisinage. « Ici, au bord de la route, dit Victor Hugo ⁽¹⁾, qui a vu les hauts fourneaux de Seraing

(1) Victor Hugo. *Le Rhin*, lettres à un ami.

en 1839, voici un effrayant chandelier de quatre-vingts pieds de haut qui flambe dans le paysage et qui jette sur les rochers, les forêts et les ravins, des réverbérations sinistres. »

C'est, paraît-il, un Français, M. Fabre-Dufour, qui eut le premier l'idée d'utiliser ces gaz en les brûlant d'une façon assurément moins pittoresque, mais beaucoup plus industrielle, dans les foyers des chaudières alimentant les puissantes machines des souffleries et des monte-charges, et dans les appareils qui servent à chauffer l'air foulé dans les fourneaux par les machines soufflantes.

Ce perfectionnement amena une économie considérable non seulement dans la dépense de combustible, mais encore dans la main-d'œuvre. Sir I. Lowthian-Bell établit ⁽¹⁾ qu'en 1845 un fourneau de 140 mètres cubes de capacité, marchant au moyen d'air chauffé à 340°, consommait 4300 kilogrammes de coke par tonne de fonte. Dix ans plus tard, l'utilisation des gaz du fourneau pour le chauffage de l'air à 430° et pour la production de la vapeur avait permis de réduire la consommation de coke du même fourneau à 3150 kilogrammes par tonne de fonte. D'autre part, d'après le même auteur, une usine comprenant douze fourneaux avait pu supprimer le travail de trente hommes employés exclusivement à entretenir le feu des chaudières et des appareils à chauffer l'air. En même temps, la puissance de production du fourneau était portée de 120 à 220 tonnes par semaine.

Depuis cette époque, on n'a cessé de perfectionner les hauts fourneaux en augmentant toujours leurs dimensions, ainsi que la pression et la température du vent soufflé, et

(1) Lowthian-Bell. *Principes de la fabrication du fer et de l'acier*, traduit par P.-F.-A. Hallopeau. Paris 1888.

l'on a pu abaisser la consommation à moins d'une tonne de coke par tonne de fonte (1).

Mais on a, par le fait, réduit proportionnellement le poids de gaz combustible dégagé par le fourneau et l'on en a en même temps diminué le pouvoir calorifique, car celui-ci dépend surtout de la quantité d'oxyde de carbone que ce gaz contient, c'est-à-dire de la proportion de carbone incomplètement brûlé dans l'appareil. Aussi est-on arrivé, à peu de chose près, à la limite où la quantité de gaz sortant du gueulard suffit strictement pour le chauffage de l'air soufflé et pour la production de la vapeur consommée par les machines qui desservent le haut fourneau. L'utilisation de ces gaz est donc parvenue au maximum que peuvent donner les procédés actuels.

Cependant l'analyse chimique et calorimétrique prouve que leur combustion complète peut dégager une quantité de chaleur bien supérieure à celle qui est réellement utilisée, tellement supérieure que la méthode actuelle d'utilisation doit être considérée comme très imparfaite et, par conséquent, susceptible d'une amélioration considérable.

Avant de montrer dans quelle voie il est possible de la chercher, nous croyons utile de déterminer d'abord la puissance calorifique de ces gaz. Cette détermination peut être faite par le calcul ou par l'expérience.

Nous appliquerons le calcul à une allure bien définie du haut fourneau, en nous servant de données pratiques qui nous ont été obligeamment fournies par M. Hiertz, chef du service des hauts fourneaux de la Société Cockerill.

Nous supposerons qu'on charge dans un fourneau un mélange formé de :

70 % de minerai Rubio de Bilbao;

(1) On annonce que la firme Carnegie vient de mettre en train quatre hauts-fourneaux produisant chacun 600 tonnes de fonte par jour en dépensant 720 kilogrammes de coke par tonne de fonte;

10 % de spath grillé du pays de Siegen ;

20 % de résidus de pyrites et *purple ore* en parties égales.

Nous admettrons qu'on y ajoute 20 % de castine d'Engis et que, dans ces conditions, on consomme une tonne de coke pour produire une tonne de fonte.

La composition des différentes substances enfournées pourra être fixée comme suit, dans ses éléments principaux :

	Rubio.	Spath.	Pyrite.	Purple ore.	Castine.
Humidité . . .	0.12	0.06	0.15	0.15	0,01
Résidu insoluble .	0.10	0.14	0.04	0.06	0.01
Fer	0.54	0.48	0.64	0.58	—
Manganèse . . .	0.008	0.08	0.04	0.04	—
Matières volatiles	0.015	0.02	0.04	0.04	0.43
Chaux	0.005	—	—	—	0,54

Le lit de fusion qui devra être chargé pour la production d'une tonne de fonte se composera de :

	Eau.	Acide carbonique.
1400 k. de Rubio contenant.	252 k.	11.20 k.
200 " spath	12 "	4.00 "
400 " résidus et purple ore	60 "	"
400 " castine.	4 "	172.00 "
1000 " coke	60 "	"
<hr/> En tout 3400 k. de mélange	<hr/> 388 k.	<hr/> 187.20 k.

La tonne de fonte produite contiendra ;

919.0 kilogr. de fer.

17.5 " manganèse.

37.5 " carbone.

25.0 " silicium.

1.0 " phosphore et soufre.

Total.

1000.0 kilogrammes.

La tonne de coke renfermait 850 kilogrammes de carbone, dont 37^k.50 sont passés dans la fonte. Le reste, soit 812^k.5, s'est combiné avec l'oxygène. Cette combustion a dégagé la chaleur nécessaire aux opérations chimiques qui ont lieu dans le haut fourneau. Mais elle n'est pas complète : une partie seulement du carbone s'est brûlée en formant de l'anhydride carbonique; l'autre a produit de l'oxyde de carbone. Cette dernière n'a donc ni développé toute la chaleur qu'elle pouvait dégager, ni produit tout l'effet réducteur dont elle était capable. Elle marque, pour ainsi dire, l'imperfection de l'opération, de sorte que le rapport entre les poids d'acide carbonique et d'oxyde de carbone qui existent dans les gaz sortant du gueulard, peut être pris comme mesure de l'économie de la marche du haut fourneau.

En Angleterre, on estime que ce rapport doit être compris entre 0.5 et 0.7. En Belgique, où l'on doit se préoccuper davantage de l'économie du combustible, on cherche toujours à atteindre et l'on dépasse même souvent le dernier chiffre⁽¹⁾. Pour avoir des données sur la variabilité du pouvoir calorifique du gaz, nous en calculerons la valeur dans l'hypothèse où le rapport $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}$ descend à 0.5 et dans celle où il s'élève à 0.7.

Désignons par x kilogrammes le poids du carbone de la tonne de coke qui a formé de l'anhydride carbonique; celui qui a produit l'oxyde de carbone sera $812.5 - x$. Les poids des deux gaz seront respectivement représentés par :

$$\frac{44x}{12} \text{ et } \frac{(812.5 - x) 28}{12}$$

les poids atomiques du C et de l'O étant 12 et 16.

⁽¹⁾ Dans ses *Etudes sur la fabrication de la fonte blanche* (Revue Universelle des Mines, t. XXXIX, 1^{re} Série) M. J. Wolters donne pour ce rapport la valeur 0,853, le fourneau étant alimenté exclusivement au moyen de minettes du Luxembourg, riches en calcaire. Mais il cite aussi d'après M. L. Bell, pour les fourneaux du Cleveland, des rapports de 0,38; 0,68; 0,54; 0,50; 0,62.

Mais les éléments du lit de fusion nécessaire pour la production d'une tonne de fonte contiennent 187^k.20 d'anhydride carbonique qui s'ajoutent aux $\frac{44x}{12}$ kilogrammes provenant de la combustion complète du carbone.

Nous aurons donc, pour les deux cas qui nous occupent, les équations suivantes :

$$\text{1^{er} cas} \quad \frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = 0.5 \quad \frac{\frac{44x}{12} + 187.20}{\frac{(812.5 - x) 28}{12}} = 0.5$$

$$\text{2^e cas} \quad \frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = 0.7 \quad \frac{\frac{44x}{12} + 187.20}{\frac{(812.5 - x) 28}{12}} = 0.7$$

On déduit de la première équation $x = 157^k.4$, et de la seconde $x = 215^k.1$.

Les poids d'oxygène qui sont entrés en combinaison avec le carbone sont :

$$\text{dans le premier cas} \quad \frac{157.4 \times 32}{12} + \frac{655.1 \times 16}{12} = 1293^k20.$$

$$\text{dans le second cas} \quad \frac{215.1 \times 32}{12} + \frac{597.4 \times 16}{12} = 1370^k10.$$

Cet oxygène a été emprunté partie aux différents corps oxydés réduits dans le fourneau, partie à l'air soufflé.

La réduction de ces corps a fourni au carbone les quantités d'oxygène suivantes :

28 ^k 6	combinés avec	27 ^k	de Silicium (SiO ²)
7 ^k 6	" "	25,10	de Manganèse (Mn ² O ³)
394 ^k 3	" "	1314.00	de Fer (Fe ² O ³)
Total 430 ^k 5.			

La combustion du carbone a donc dû emprunter à l'air soufflé dans le fourneau 862^k.7 d'oxygène dans le premier cas et 939^k.6 dans le second.

Or, la composition normale de l'air, en poids, peut être estimée de la façon suivante :

Azote.	76.045
Oxygène	23.125
Eau	0.750 contenant 0.667 d'oxygène
Anhydride carbonique.	0.080

Pour fournir le poids d'oxygène nécessité par la combustion du carbone dans le fourneau, il a fallu :

dans le premier cas, $\frac{862.7 \times 100}{23.125 + 0.667} = 3626$ kilogr. d'air.

dans le second cas, $\frac{939.6 \times 100}{23.125 + 0.667} = 3949$ id.

Nous possédons maintenant toutes les données nécessaires pour établir la composition et le poids total des gaz dégagés, par tonne de fonte, dans les deux hypothèses que nous avons considérées. Le tableau suivant fait connaître cette composition :

	1 ^{er} CAS	2 ^e CAS	
Azote. kil.	2757.4	3003.0	
Anhydride carbonique } provenant {	de la combustion.	577.1	788.3
	de la décomposition des carbonates	187.2	187.2
	de l'air soufflé.	2.9	3.2
Oxyde de carbone	1534.4	1398.0	
Hydrogène provenant de l'eau contenue dans l'air	3.0	3.3	
Vapeur d'eau provenant du minéral et du coke et non décomposée	388.0	388.0	
TOTAL.	5450.0	5771.0	

Nous n'avons pas tenu compte d'un élément dont l'analyse révèle la présence dans les gaz des hauts fourneaux, surtout quand on ajoute de la houille crue à la charge : ce sont les carbures d'hydrogène. Les gaz en renferment souvent 1%. Admettons ce chiffre et portons en conséquence à 5500 et à 5830 kilogrammes ⁽¹⁾ le poids des gaz dégagés par tonne de fonte. Ces gaz présentent la composition centésimale suivante :

	1 ^{er} CAS	2 ^e CAS
Azote.	50.12	51.51
Anhydride carbonique.	13.95	16,78
Oxyde de carbone	27.90	23.98
Hydrogène et Hydrocarbures	1.02	1.07
Vapeur d'eau	7.01	6.66
	100.00	100.00

La combustion d'un kilogramme d'oxyde de carbone développe environ 2435 calories. Les hydrocarbures ont des pouvoirs calorifiques variables suivant leur composition. Nous ne nous écarterons pas beaucoup de la vérité en évaluant de 13500 à 14000 calories par kilogramme la chaleur dégagée par la quantité relativement faible d'hydrogène et d'hydrocarbures qui entrent dans la composition des gaz.

Nous trouvons ainsi que la combustion totale d'un kilogramme de gaz de haut fourneau développera, dans le premier cas, environ 820 calories, et dans le second cas, 730 calories.

(1) Dans un remarquable mémoire publié dans *Stahl und Eisen* et traduit par M. Krawtsoff dans le n° d'octobre 1894 de la *Revue Universelle des Mines*, M. le conseiller des mines Wedding établit que le poids de gaz dégagé par tonne de fonte varie de 5070 à 16980 kilogrammes lorsque le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ passe de 0.3 à 0.9.

Desséché, ramené à 0° C et à la pression de 760 millimètres de mercure, le mètre cube de chacun de ces deux gaz pèserait respectivement 1^k.322 et 1^k.338 et aurait un pouvoir calorifique de 1166 et 1046 calories. A la température moyenne de 15° C et avec 1% d'humidité, le pouvoir calorifique du mètre cube serait abaissé à 1094 et à 982 calories.

Les résultats que nous venons de déduire du calcul sont confirmés par l'expérience. On a, en effet, prélevé, aux hauts fourneaux de la société Cockerill, des prises de gaz, pendant une quinzaine de jours, dans les diverses circonstances de la marche de ces appareils. Les échantillons ainsi recueillis ont été analysés par M. Witz au moyen de la bombe calorimétrique. Leur pouvoir calorifique par mètre cube et à volume constant est indiqué dans le tableau suivant :

1 ^{er}	Echantillon.	. . .	990	calories	
2 ^e	id.	. . .	964	"	
3 ^e	id.	. . .	949	"	
4 ^e	id.	. . .	1084	"	
5 ^e	id.	. . .	1032	"	Maximum 1084
6 ^e	id.	. . .	1020	"	
7 ^e	id.	. . .	968	"	Moyenne 997
8 ^e	id.	. . .	970	"	
9 ^e	id.	. . .	1022	"	Minimum 961
10 ^e	id.	. . .	1012	"	
11 ^e	id.	. . .	991	"	
12 ^e	id.	. . .	961	"	

L'accord entre les résultats trouvés par les deux méthodes est aussi satisfaisant que possible et permet de leur accorder une entière confiance.

On estime à 40 % du poids total des gaz recueillis au gueulard, la fraction nécessaire pour le chauffage de l'air

soufflé dans les fourneaux et à 60% celle dont on peut disposer pour la production de la vapeur destinée à alimenter les moteurs.

Pour ne rien exagérer, nous admettrons que la quantité de gaz réellement utilisable pour la production du travail moteur soit de 50 % seulement du poids total. La combustion complète des gaz que l'on brûle actuellement dans les foyers des chaudières dégagerait ainsi, en chiffres ronds, pour chaque tonne de fonte produite et dans l'hypothèse d'une captation totale de ces gaz :

dans le premier cas $5500 \times 820 \times 0.5 = 2.750.000$ calories
 dans le second cas $5830 \times 730 \times 0.5 = 2.128.000$ " .

On peut évaluer à 13 % la fraction de la chaleur développée par la combustion qui peut être convertie en travail par les installations de machines à vapeur les plus parfaites connues (1).

Mais on reste presque toujours bien en dessous de ce rapport. Le rendement des chaudières, c'est-à-dire le rapport entre la chaleur communiquée à l'eau et celle que développe la combustion a varié, dans des expériences très soignées exécutées par MM. Bryan Donkin et Kennedy sur un grand nombre de générateurs de types différents, de 0,568 à 0,826. Il ne dépasse pas, dans la plupart des cas, 0,60.

D'autre part, la machine à vapeur n'utilise qu'une faible fraction de la chaleur qui lui est amenée par la vapeur. Ainsi, dans des essais auxquels nous avons pris part et qui ont été effectués en 1896 au laboratoire de mécanique appliquée de l'Université de Liège sous la direction du professeur Dwelshauvers-Dery, cette fraction a oscillé entre

(1) BOULVIN. *Cours de mécanique appliquée*, 3^e fascicule p. 295.

(2) *Revue Universelle des Mines*, 3^e série, t. XXXIV et XXXVI.

0,113 et 0,066, le premier chiffre étant obtenu lorsque la machine fonctionnait avec vapeur surchauffée, condenseur, enveloppe de vapeur et chapelle purgée, et le second avec vapeur saturée, sans enveloppe et chapelle non purgée. Encore ces rapports, relatifs au travail indiqué, doivent-ils être diminués pour tenir compte des résistances passives.

Le travail utile ne doit pas dépasser dans beaucoup d'installations 4 à 5 % de la chaleur développée par le combustible ; de sorte que les machines activées par des chaudières chauffées au moyen des gaz provenant d'un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour auraient une puissance utile variant entre 550 et 900 chevaux.

L'utilisation directe de la chaleur de combustion dans les cylindres des machines à gaz donne des résultats bien supérieurs. Il résulte des mesures faites par MM. Kennedy, Hopkinson et Beauchamp-Tower sur des moteurs à gaz de 11 à 17 chevaux indiqués, que le rapport entre le travail et la chaleur produite par la combustion des gaz varie de 21,1 à 22, 8 % (1). En ne prenant que le chiffre minimum et en tenant compte des résistances passives, on trouve que les gaz du haut fourneau produiraient, si on les employait directement dans les cylindres de moteurs à gaz, une puissance variant entre 2350 et 3000 chevaux utiles.

Le bénéfice obtenu par la substitution de moteurs à gaz aux moteurs à vapeur actuellement en usage serait par conséquent, pour un seul haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour, de 1800 à 2000 chevaux vapeur. Le travail ainsi économisé suffirait pour activer une usine métallurgique considérable.

Ainsi, la société Cockerill, qui possède actuellement six hauts fourneaux produisant chaque jour 650 tonnes de fonte

(1) Voir notre mémoire sur *Les moteurs thermiques autres que la machine à vapeur*, REVUE UNIVERSELLE DES MINES, années 1891 et 1892.

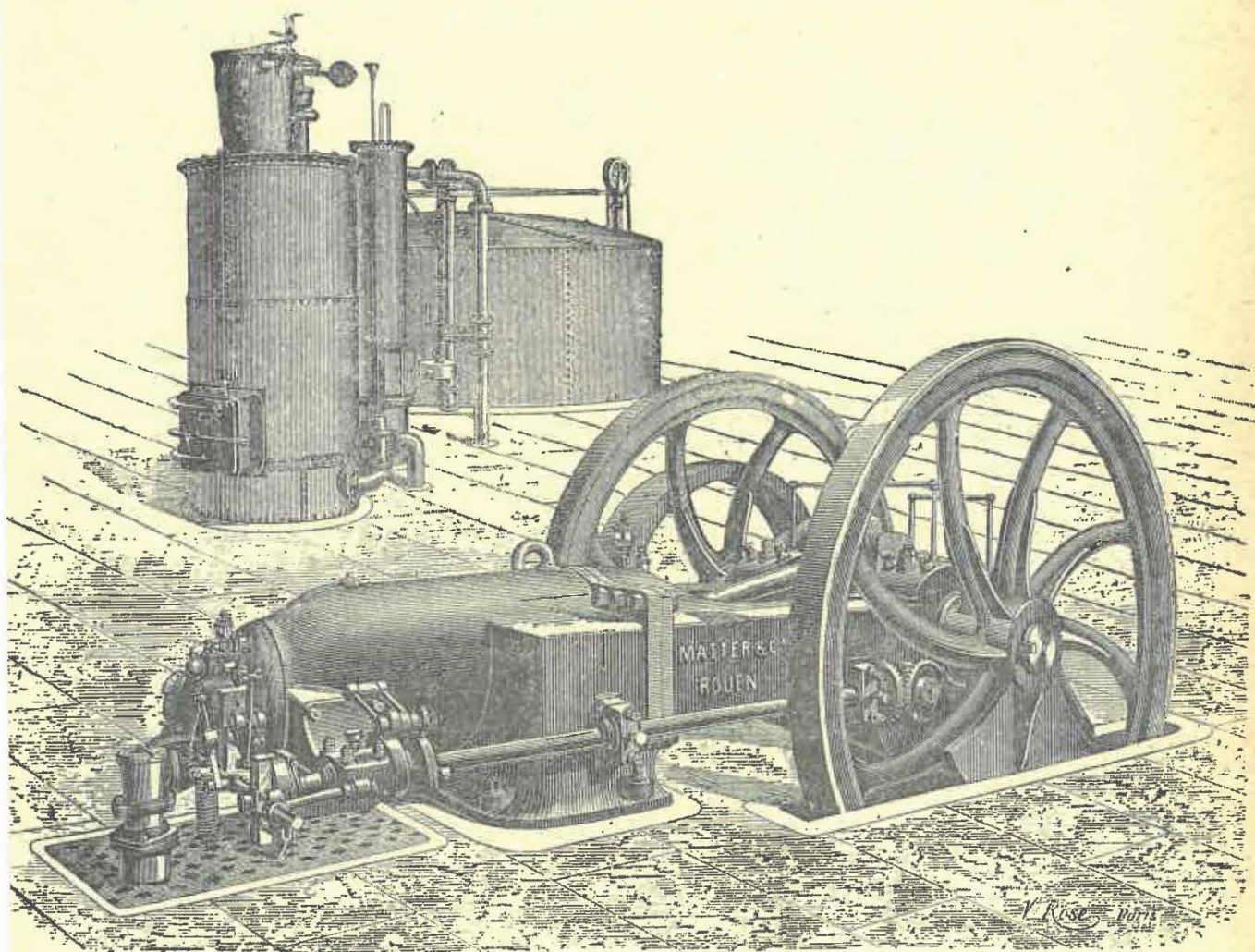
et dont les gaz disponibles sont entièrement consommés pour l'alimentation des moteurs affectés à leur service, trouverait dans la substitution que nous venons d'indiquer une puissance utilisable d'environ 12000 chevaux. C'est à peu près exactement la puissance de tous les moteurs fixes qu'elle emploie, de sorte que cette transformation, si elle était réalisable pratiquement, lui permettrait de supprimer toutes ses chaudières à l'exception de celles des locomotives.

M. Bailly, ingénieur aux ateliers de construction de cette société, s'était rendu compte de l'énorme économie qui devait ainsi résulter de l'utilisation directe des gaz des hauts fourneaux dans les moteurs. Restait toutefois à résoudre la question de savoir si cette utilisation était pratiquement réalisable. Il y avait, en effet, lieu de craindre que le faible pouvoir calorifique, et surtout la variation de composition et de pression de ces gaz, n'en rendissent l'usage difficile, pour ne pas dire impossible, pour l'alimentation des moteurs. L'expérience seule pouvait répondre à cette question.

Sur la proposition de M. Bailly, le directeur général de la société Cockerill décida de faire un essai dans cette voie. Il chargea M. Bailly de rechercher avec M. F. Kraft de la Saulx fils, ingénieur de la même société, le moteur qui se prêterait le mieux à l'utilisation des gaz pauvres produits par les hauts fourneaux.

Après de nombreuses études, ils arrêtèrent leurs préférences sur le moteur Simplex, créé par MM. Delamare-Deboutteville et Malandin et construit par les ateliers Matter et C^{ie} de Rouen. Ce moteur a depuis longtemps déjà fait ses preuves pour l'emploi des gaz pauvres produits par les gazogènes Dowson et Buire-Lencachez. Mais le pouvoir calorifique de ces gaz est encore sensiblement supérieur à celui des gaz de hauts fourneaux. Il varie

entre 1280 et 1630 calories ⁽¹⁾. Toutefois, le mode particulier d'allumage adopté dans le moteur Simplex et qui consiste à produire, au sein du mélange de gaz et d'air préalablement comprimé, une suite ininterrompue de puissantes étincelles électriques, permettait d'espérer qu'il réussirait



Vue d'ensemble d'une installation au gaz pauvre.

également à enflammer le gaz des hauts fourneaux dans les mêmes conditions.

⁽¹⁾ Voir notre mémoire cité plus haut..

Avant de faire connaître les résultats obtenus aux usines Cockerill, nous croyons utile de donner une description succincte du moteur Simplex. Celui-ci est très connu et a été souvent décrit, mais nous éviterons ainsi au lecteur une recherche inutile.

La fig. 1, est une coupe du moteur par un plan vertical

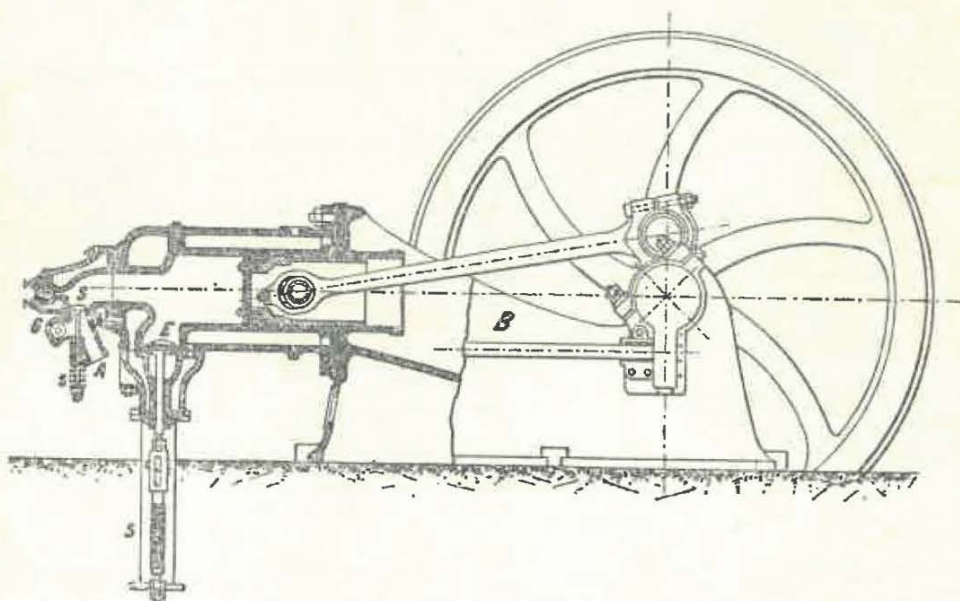
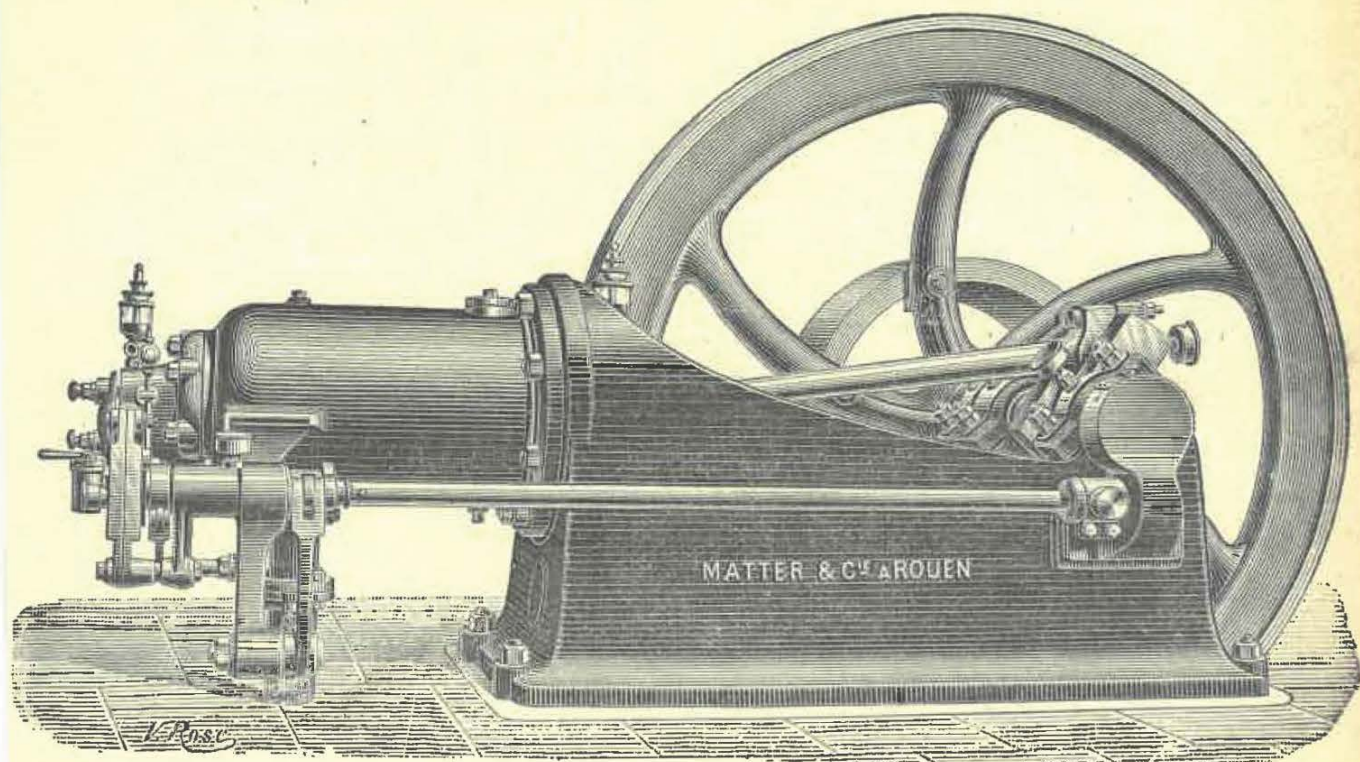


FIG. 1.

passant par l'axe du cylindre. La fig. 2 donne la vue du fond de ce cylindre avec les organes de la distribution. La fig. 3 est une coupe verticale de la chambre de combustion à une échelle plus grande. Enfin la fig. 4 représente une coupe horizontale passant par le tiroir d'inflammation. Chaque organe porte la même lettre sur les différentes figures.



Moteur Simplex de 8 chevaux installé aux usines Cockerill.

Comme le montrent la fig. 1 et la vue d'ensemble ci-dessus, le moteur Simplex offre le même aspect général que la plupart des moteurs à gaz horizontaux. Le cylindre unique est boulonné en porte-à-faux à l'extrémité d'un bâti en fonte portant les paliers de l'arbre moteur, qui est coudé. Le volant et la poulie de transmission sont placés en porte-à-faux sur cet arbre, en dehors des paliers. La bielle s'articule directement au piston qui a la forme dite « en fourreau ».

Le cycle des opérations de ce moteur est le cycle dit « à quatre temps », imaginé par Beau de Rochas en 1862 et réalisé pour la première fois, en 1876, par Otto, dont le moteur dut à son adoption une supériorité incontestable et une vogue qui ne s'est jamais éclipsée depuis l'époque de

son apparition. Ce cycle comprend quatre courses du piston, dont une seule, la troisième, développe du travail moteur :

Première course, *avant* : Aspiration du gaz et de l'air atmosphérique dans le cylindre.

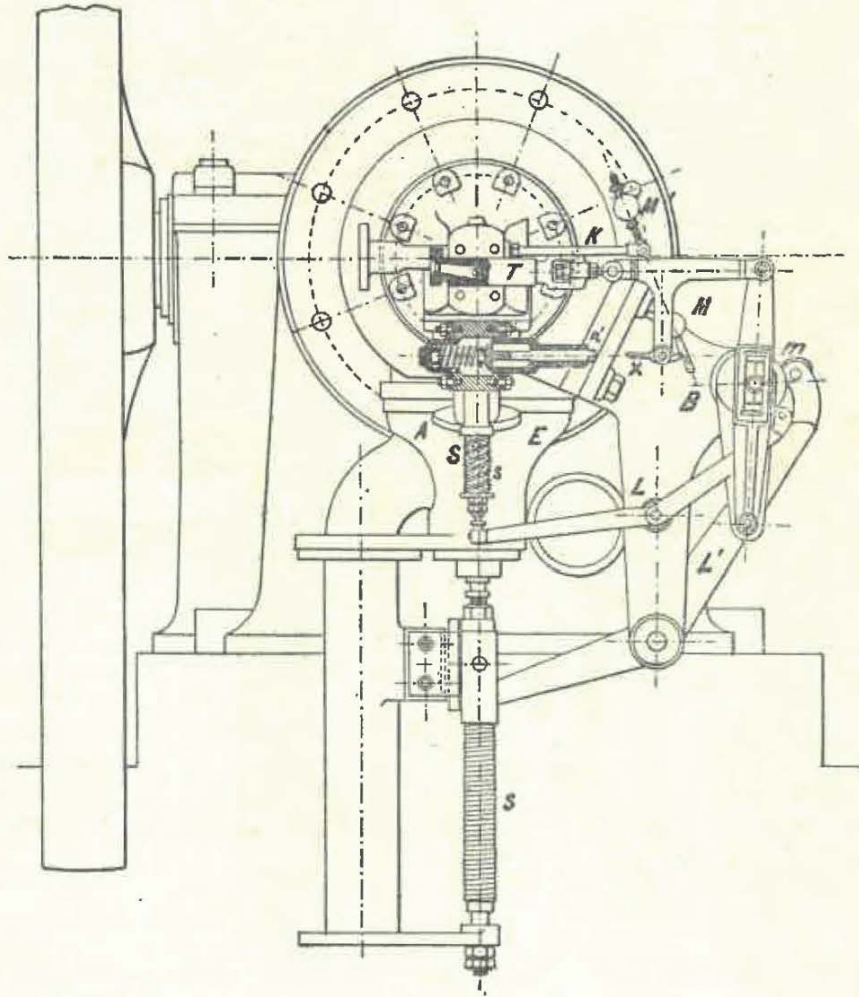


FIG. 2.

Deuxième course, *arrière* : Compression du mélange gazeux pour le rendre plus homogène, augmenter son inflammabilité et assurer une combinaison plus rapide et plus complète des deux gaz.

Troisième course, *avant* : Inflammation du mélange et

détente des gaz portés par l'explosion à une température et à une pression très élevées.

Quatrième course, *arrière* : Expulsion des gaz brûlés.

Le mécanisme de la distribution disposé de façon à produire ces quatre phases successivement, comprend :

1° Une soupape d'*admission* du mélange, S, s'ouvrant

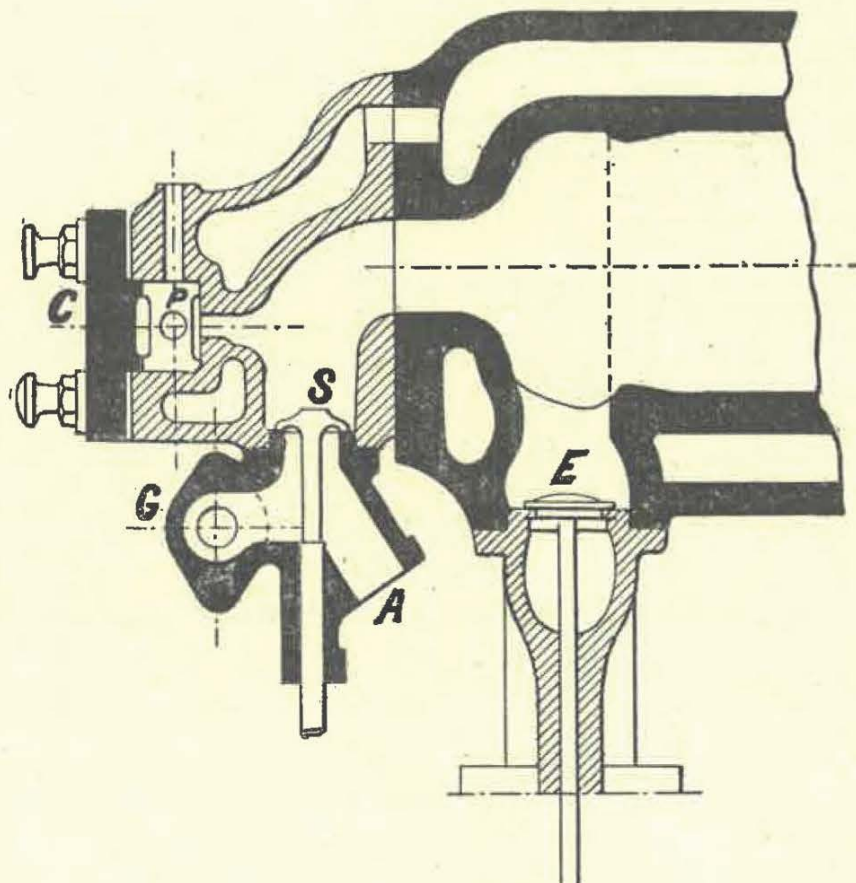


FIG. 3.

dans une chambre qui forme le fond du cylindre et dans laquelle le gaz arrive par le conduit G et l'air par le canal A (fig. 1 et 3).

2° Une soupape d'*émission* E s'ouvrant dans le fond du cylindre en avant de S. Ces deux soupapes sont rappelées sur leur siège par de puissants ressorts en hélice s.

3° Un tiroir d'allumage T (fig. 4) composé d'une plaque P glissant entre le fond F du cylindre et une contreplaque ou chapeau C. Cette plaque est percée d'une ouverture O où arrivent deux pointes de platine p et p' entre lesquelles jaillit l'étincelle de l'inflamateur électrique. Cette ouver-

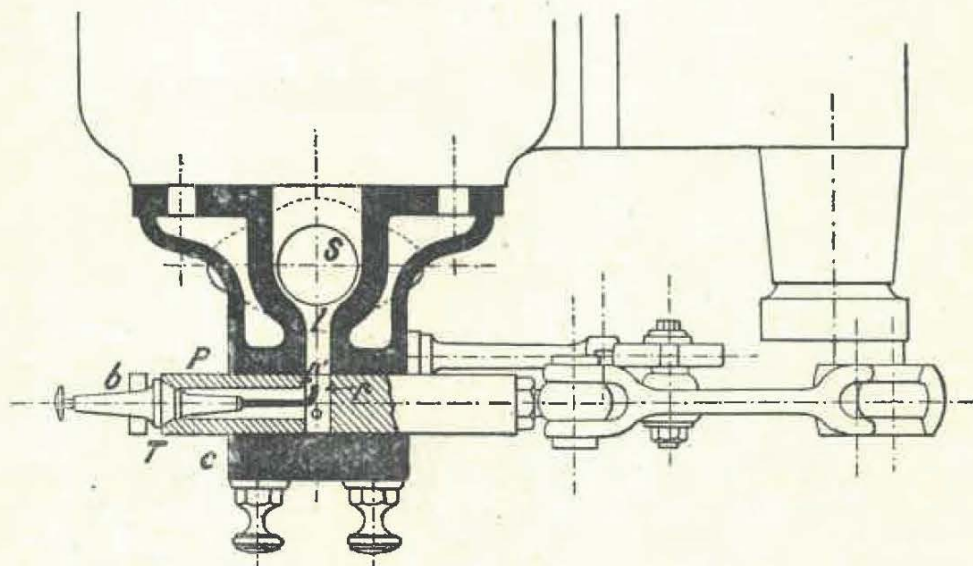


FIG. 4.

ture vient se placer, à la fin de la période de compression, en face d'une lumière l pratiquée dans la glace formant le fond du cylindre. Le tiroir possède une autre cavité qui reçoit la borne en porcelaine b traversée par une tige de cuivre. Celle-ci porte à une extrémité la pointe p et est filetée à l'autre dans une borne en cuivre où se fixe le fil qui la relie à une bobine d'induction fonctionnant d'une façon continue pendant la marche du moteur.

4° Un arbre B parallèle à l'axe du cylindre et par conséquent perpendiculaire à l'arbre moteur qui lui communique son mouvement de rotation par l'intermédiaire de deux roues d'angle. Les nombres de dents de celles-ci sont dans le rapport de 1 à 2, de sorte que l'arbre B ne fait qu'un tour pour quatre courses du piston, c'est-à-dire pour un

cycle entier. Cet arbre commande, par des cames convenablement placées les leviers L et L' qui ouvrent les soupapes d'admission et d'émission et, par une manivelle à coulisse *m*

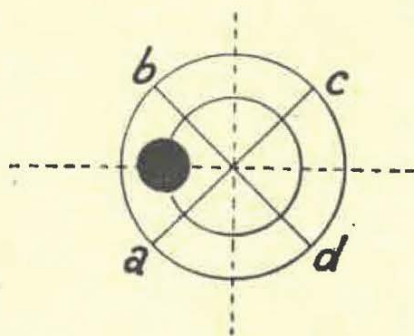


FIG. 5.

fixée à son extrémité, le levier qui actionne le tiroir d'inflammation.

La manivelle du tiroir est calée de façon que, pendant

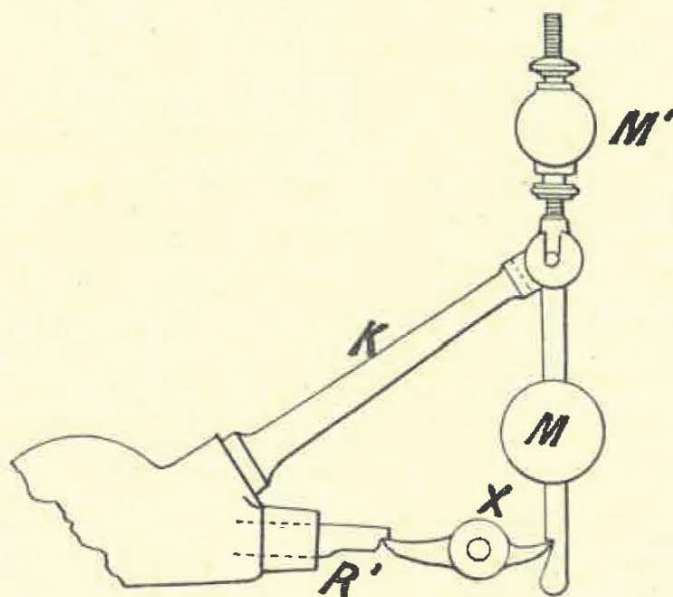


FIG. 6.

la première course avant du piston, elle décrive l'arc *ab* (fig. 5) comprenant 45 degrés de part et d'autre de l'hor-

zontale. Pendant ce mouvement, le déplacement longitudinal du tiroir est très faible. Tandis que le piston revient en arrière, en comprimant le mélange, la manivelle décrit l'arc *bc* et amène, à la fin de la course, l'inflamateur en communication avec l'ouverture *l* pratiquée dans le fond du cylindre.

Cette communication persiste pendant la deuxième course avant du piston, la manivelle du tiroir décrivant alors l'arc *cd*. Enfin, pendant la période d'expulsion des gaz, le bouton de la manivelle parcourt l'arc *da* et ramène le tiroir à sa position initiale.

La régularisation de la vitesse de ce moteur s'obtient en

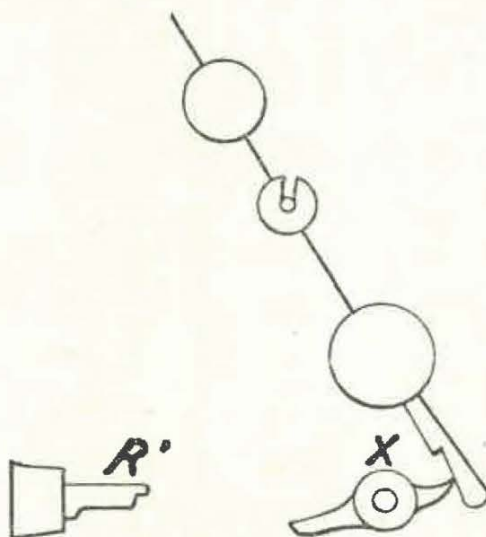


FIG. 7.

supprimant l'arrivée du gaz lorsque la résistance utile diminue. Le régulateur adopté par MM. Delamare et Malandin est extrêmement simple, très sensible et facile à régler. Il consiste en un pendule oscillant à l'extrémité d'un bras *K* fixé au fond du cylindre (fig. 2 et 6). Ce pendule porte deux masses dont l'une *M* est fixe, tandis que l'autre *M'* est mobile et permet, par conséquent, de faire varier à volonté la durée de son oscillation.

Lorsque le tiroir revient en arrière pour enflammer le gaz pendant la deuxième course du piston, le pendule est écarté de la verticale par un appendice de la tige du tiroir (fig. 2 et 7). Lorsque le tiroir retourne à sa position initiale pendant la période d'émission, le pendule retombe en obéissant à la pesanteur. Il rencontre dans sa chute un petit levier X porté par l'appendice de la tige du tiroir et maintenu incliné par un petit ressort. Ce levier s'engage dans une encoche pratiquée dans le pendule et est ainsi amené à prendre la position horizontale (fig. 6). Dans cette situation

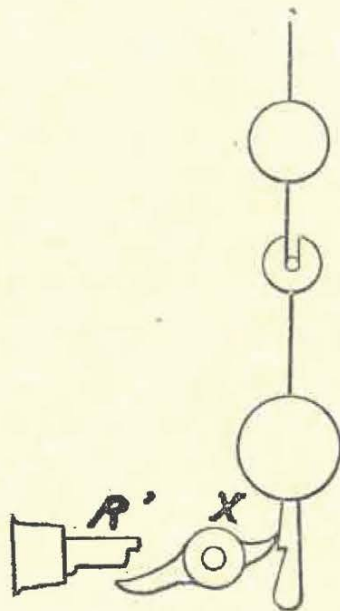


FIG. 8.

des choses, le levier X entraîné par le tiroir vient frapper la tige R' d'une soupape à ressort R placée sur le tuyau d'arrivée du gaz au cylindre et la maintient ouverte pendant toute l'admission. (Voir la disposition de cette soupape, fig. 9.)

Mais si la rotation du moteur vient à s'accélérer sensiblement, le pendule continuant à exécuter son oscillation dans le même temps que précédemment, abandonnera le

levier X dont la marche devient plus rapide et ne le rencontrera plus à temps pour le placer horizontalement avant que celui-ci n'arrive au contact de la soupape R. Il manquera donc cette soupape (fig. 8), qui restera fermée et par conséquent le cylindre ne recevra que de l'air pur jusqu'à ce que la vitesse soit ramenée à sa valeur normale. On peut faire varier celle-ci en élevant ou en abaissant la boule

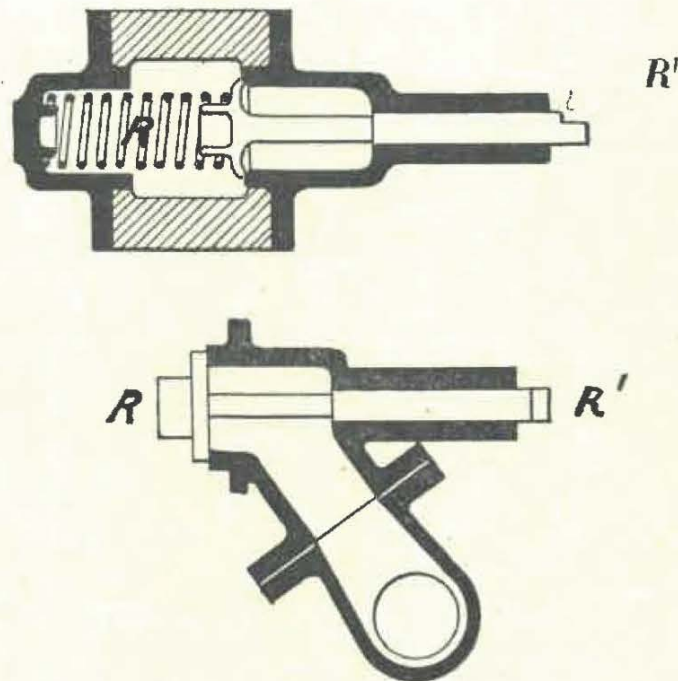


FIG. 9.

mobile du pendule, ce qui diminue ou augmente la durée de l'oscillation.

La mise en marche des moteurs d'une puissance intérieure à dix chevaux s'obtient facilement en faisant tourner la machine à bras au moyen du volant. Mais ce procédé n'est plus possible pour les grands moteurs où la résistance produite par la compression du mélange et les frottements devient trop considérable. Dans ces grands moteurs, le fond du cylindre (fig. 10) porte un robinet à trois voies *r* relié

par un tube de caoutchouc à un autre robinet r' branché sur la conduite d'amenée du gaz. Le robinet r (fig.11) est percé d'un trou oblique permettant l'entrée de l'air. Le moteur étant arrêté au point où l'inflammation se produit, on ouvre le robinet à trois voies, on déplace le piston vers l'avant du cylindre, ce qu'un homme peut faire à la main pour les moteurs de 10 à 30 chevaux, et au moyen d'un petit treuil

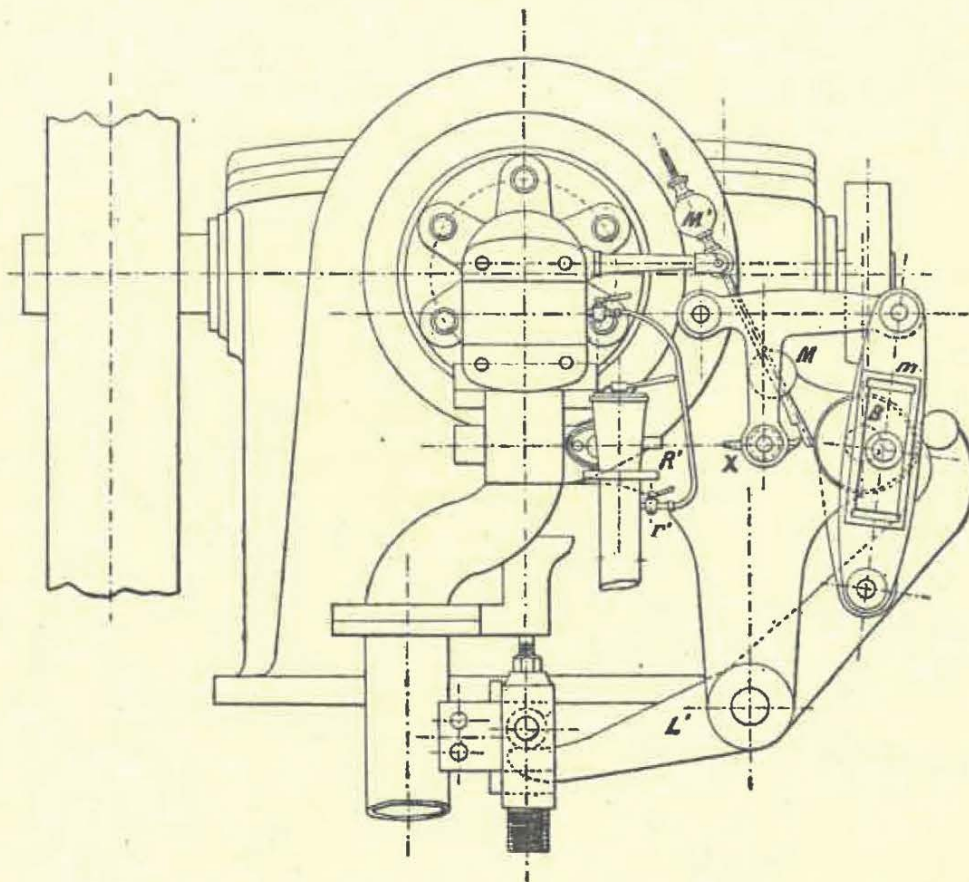


Fig. 10.

pour les moteurs d'une puissance supérieure à 30 chevaux. On aspire ainsi le gaz et l'air jusqu'aux deux tiers environ de la capacité du cylindre, on ouvre le robinet d'admission, on ramène ensuite le piston en arrière, après avoir fermé le robinet à trois voies, de manière à comprimer légèrement le mélange et on fait fonctionner le trembleur de la bobine

d'induction. L'étincelle jaillit, l'inflammation se produit et l'impulsion reçue par le piston est généralement suffisante pour que le moteur continue à marcher jusqu'à l'inflammation suivante.

On facilite la mise en train du moteur en diminuant pendant les premiers tours le degré de compression du mélange au moyen d'un galet qui maintient ouverte la soupape d'échappement pendant une fraction de la course.

Les constructeurs de ce moteur avaient exposé à Paris, en 1889, une machine de 100 chevaux à un seul cylindre qui fit alors sensation. C'était, en effet, la première fois qu'on

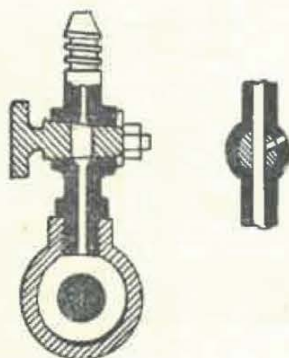


Fig. 11.

construisait un moteur à gaz monocylindrique de cette puissance. Mais depuis, encouragé par le succès, on est allé bien au delà. MM. Delamare et Malandin ont construit des moteurs développant, avec les gaz pauvres produits par les gazogènes Lencachez, 320 chevaux indiqués et donnant, par conséquent, plus de 250 chevaux utiles. Un moteur de cette puissance, à cylindre unique, fonctionne depuis deux ans aux moulins de Pantin au moyen de gaz pauvres fournis par des gazogènes du système Buire-Lencachez. Ces gazogènes consomment des charbons maigres d'Anzin et le gaz qu'ils produisent a un pouvoir calorifique de 1200 à 1500 calories par mètre cube.

La fig. 12 représente une vue de l'installation de M. Truffaut, à Paris, comprenant 2 moteurs à gaz pauvre de 250 chevaux utiles chacun et 1 de 30 chevaux.

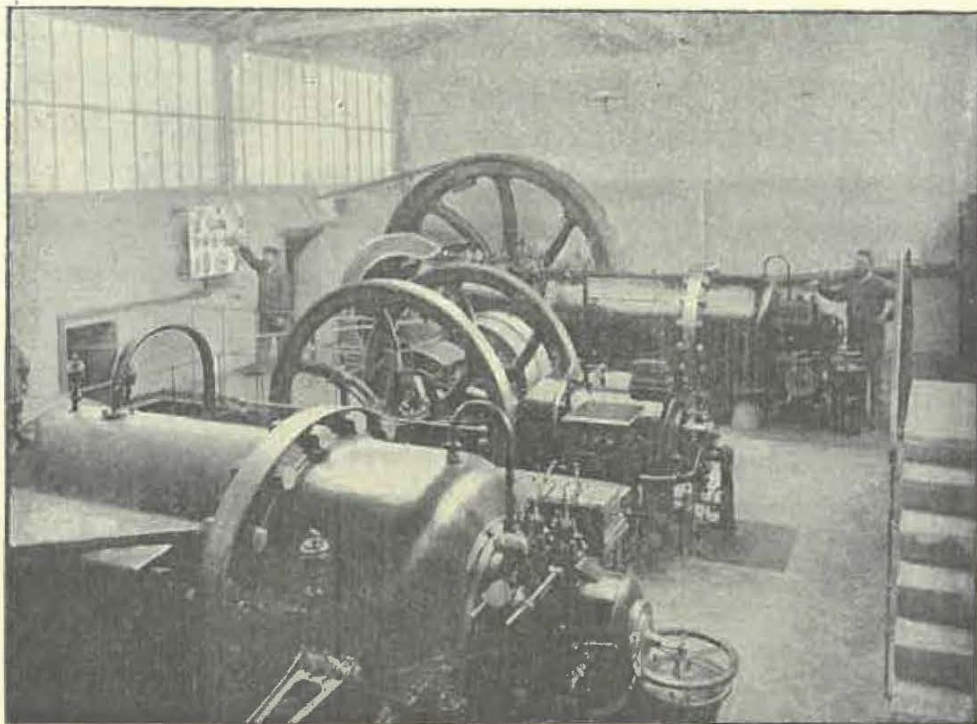


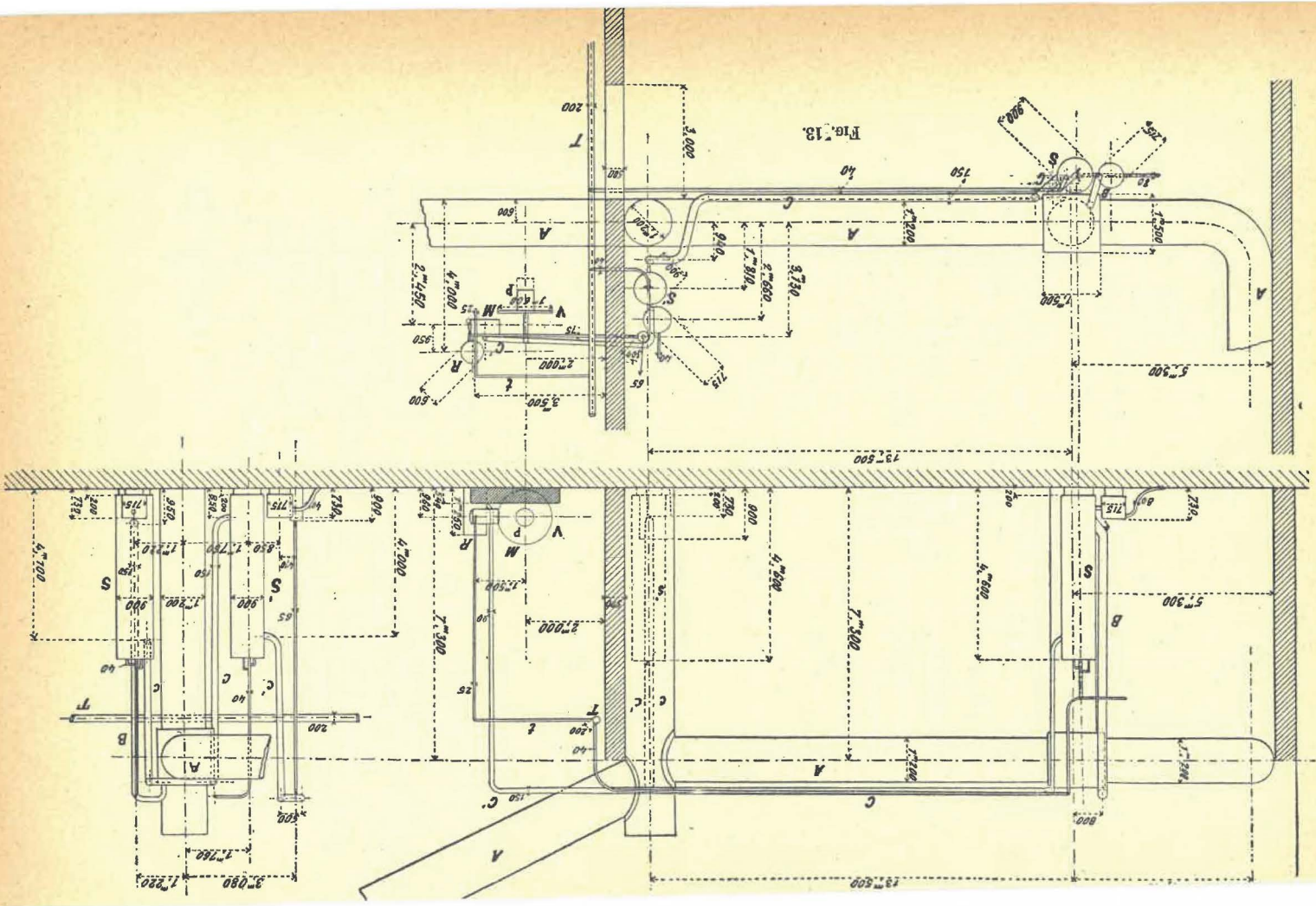
FIG. 12.

Les autres constructeurs ont également produit des moteurs de grande puissance. La maison Otto de Deutz construit des machines monocylindriques développant 125 chevaux utiles avec le gaz d'éclairage et 100 chevaux avec les gaz pauvres. La maison Crossley construit également des moteurs Otto à un cylindre, d'une puissance de 120 chevaux. On peut évidemment, en accouplant plusieurs cylindres, obtenir des puissances plus grandes encore. La maison Otto a ainsi un type donnant 200 chevaux avec les gaz pauvres, et la maison qui construit les moteurs Griffin à double effet annonce des machines pouvant développer 400 chevaux. La firme Fielding et Platt exposait à Anvers, en 1894, un moteur à deux cylindres en tandem donnant 160 chevaux effectifs.

Ce que nous venons de dire de l'économie réalisable par l'emploi direct des gaz de hauts fourneaux dans les moteurs et de la possibilité de construire des moteurs à gaz de grande puissance donne le plus haut intérêt à l'essai qui a été tenté par la société Cockerill en vue de s'assurer si ces gaz peuvent être pratiquement utilisés pour la production du travail moteur. Ayant pris le 15 mai 1895 un brevet pour cette application des gaz de fourneaux (n° 115779) elle installa, dès la fin de cette année, un moteur Simplex d'une puissance utile de 8 chevaux dans l'atelier de réparation de la division des hauts fourneaux pour en activer l'outillage. Le diamètre du cylindre est de 0^m.194 et la course du piston de 0^m.350.

Les gaz sortant des hauts fourneaux entraînent avec eux beaucoup de poussières qui présentent peu d'inconvénients dans les foyers des chaudières sous lesquelles on brûle actuellement ces gaz, mais qui encrasseraient rapidement les soupapes et le cylindre du moteur. On a installé, pour les arrêter, un appareil laveur qui a parfaitement réussi. Cet appareil, consistant en réalité en deux scrubbers, est représenté par la figure 13. A est la conduite qui amène les gaz des hauts fourneaux aux chaudières et sur laquelle on prend le gaz pour le moteur par le tuyau B. Celui-ci amène le gaz dans une première colonne à coke ou *scrubber* S. Le gaz y rencontre une pluie lancée par trois injecteurs Koerting qui prennent l'eau à la conduite des tuyères T, et sort par le tuyau C. Il traverse ensuite un second scrubber semblable S' et se rend, par le tuyau C', à un réservoir R placé près du moteur M et faisant l'office de poche à gaz; t est le tuyau par lequel arrive l'eau qui circule dans l'enveloppe du cylindre pour le refroidissement des parois et qui est également prise à la conduite des tuyères.

Fig. 13.



Le moteur a été mis en marche le 27 décembre 1895 et a fonctionné immédiatement sans difficulté. La seule modification qu'on ait dû y apporter, en vue de faciliter l'inflammation, consiste à augmenter la compression préalable à l'allumage. Dans le modèle courant livré par le constructeur, l'espace mort dans lequel a lieu cette compression représente 16.8 % du volume total, de sorte que la tension finale dépasse un peu 6 atmosphères. On a réduit, dans le moteur installé à l'usine Cockerill, l'espace mort à 11.8 % et l'on a ainsi élevé la tension initiale à 9 1/2 atmosphères environ. On a aussi substitué aux piles à bichromate qui actionnent la bobine de Ruhmkorff, des accumulateurs électriques qui fonctionnent d'une façon plus régulière et donnent des étincelles toujours suffisamment puissantes pour enflammer les gaz pauvres des fourneaux.

Grâce à ces modifications, le moteur n'a cessé de marcher sans difficulté malgré les variations de pression qui se produisent fatalement dans la conduite suivant les circonstances du travail des fourneaux et qui vont de 0 à 80 millimètres d'eau. Le moteur a même fonctionné une fois sous une dépression de 200 millimètres résultant du calage accidentel du compteur qu'on a intercalé dans la conduite pour mesurer sa consommation.

Au début, on fournissait beaucoup d'eau à l'enveloppe et on maintenait ainsi la température des parois relativement basse. On a reconnu qu'il valait mieux, pour assurer l'inflammation, laisser monter la température de l'eau à 75° C. Mais le moteur a fonctionné avec des températures allant de 20 à 100° C.

Il ne s'est pas montré moins élastique au point de vue de la vitesse. Il exécute normalement 180 à 200 révolutions par minute; mais il a parfaitement supporté une vitesse de 250 tours et, d'autre part, il a pu tourner à raison de 95 tours seulement par minute dans un cas où la fabrica-

tion de pièces spéciales exigeait une marche très lente des machines-outils.

Des diagrammes ont été pris fréquemment sur ce moteur par M. Bailly et ont fourni des données intéressantes, bien qu'il n'ait été soumis jusqu'à présent à aucun essai en règle. Nous citerons notamment les résultats suivants qui doivent donc être considérés comme approximatifs, mais qui suffisent déjà pour montrer ce que l'on peut attendre industriellement de cette application des gaz :

1° Le rendement organique a été de 0,766 pour un travail utile de 4,8 chevaux.

2° La pression moyenne indiquée augmente avec la pression du gaz dans la conduite. Ainsi, 4 diagrammes ayant été levés sous des pressions de 10, 25, 30 et 50 millimètres d'eau dans la conduite, la pression moyenne dans le cylindre s'est élevée respectivement à 2 k. 40, 2 k. 50, 2 k. 75 et 2 k. 85 par c. q.

3° Dans une autre série d'expériences, le moteur faisant 218 tours par minute avec 87 explosions, la pression moyenne était de 2 k. 63 par c. q. et la puissance indiquée 5,26 chevaux. La puissance utile était donc de 4 chevaux. La consommation de gaz, mesurée au compteur, a été de 21200 litres par heure.

Dans ces conditions, le moteur dépensait donc 4^m.03 de gaz par cheval indiqué et par heure, et 5^m.300 par cheval-utile. Comme nous l'avons déjà fait observer, ces nombres ne peuvent être considérés que comme des approximations, le compteur n'ayant pas été vérifié spécialement.

4° Lorsqu'on prend une série de diagrammes, on constate d'assez grandes variations dans la pression explosive qui est d'autant moins élevée qu'elle tarde plus à s'établir. La puissance indiquée diminue à mesure que la combustion est plus lente, mais dans un rapport notablement moindre que la pression explosive. Cette différence provient de ce

que la courbe de détente s'abaisse plus rapidement dans les cas où la pression explosive s'établit brusquement au début.

Trois diagrammes pris consécutivement à la vitesse de 215 tours ont donné les résultats suivants :

Pression explosive : kgs/cq. . . .	13.7	7.5	5.3
Pression moyenne : kgs/cq. . . .	2.6	2.2	1.75
Puissance indiquée : chevaux . . .	6.45	5.45	4.25

Ainsi, pour des pressions explosives diminuant dans le rapport de 100 à 56 et à 38.5 les puissances indiquées ne décroissent que proportionnellement aux nombres 100, 85 et 67.5.

Ces résultats confirment le fait établi théoriquement, et vérifié expérimentalement dans d'autres circonstances, que l'effet utile augmente à mesure que la combustion se fait plus rapidement et que la pression maxima est plus élevée. Ces deux conditions élèvent en effet la température maxima du fluide évoluant et par conséquent son rendement thermique. Toutefois, on constate qu'on peut retarder dans une certaine mesure la combustion et par conséquent diminuer à la fois la brusquerie de l'élévation de pression et la grandeur du maximum de celle-ci sans nuire considérablement à l'effet utile du moteur. Or on fatigue moins, en agissant ainsi, les articulations et les guides du moteur. C'est ce qui explique pourquoi les constructeurs préfèrent prolonger un peu la combustion et ne pas produire l'explosion à volume constant.

Nous reproduisons dans la fig. 14 un diagramme isolé pris sur le moteur, et dans la fig. 15 une suite de diagrammes tels qu'on les obtient en laissant l'indicateur fonctionner pendant plusieurs tours. On constate très nettement sur ces diagrammes l'influence du retard à l'explosion que nous venons d'examiner. On y aperçoit aussi facilement les *ratés*

résultant de l'interruption de l'arrivée du gaz par le régulateur ou de sa non-inflammation.

5° La quantité d'eau dépensée pour le lavage du gaz est d'environ 1400 litres par cheval utile et par heure. La même eau peut naturellement être utilisée plusieurs fois pour cette opération. Elle pourrait, du reste, être réduite.

Nous pouvons maintenant résumer les résultats de l'étude que nous venons de faire et en tirer les conclusions :

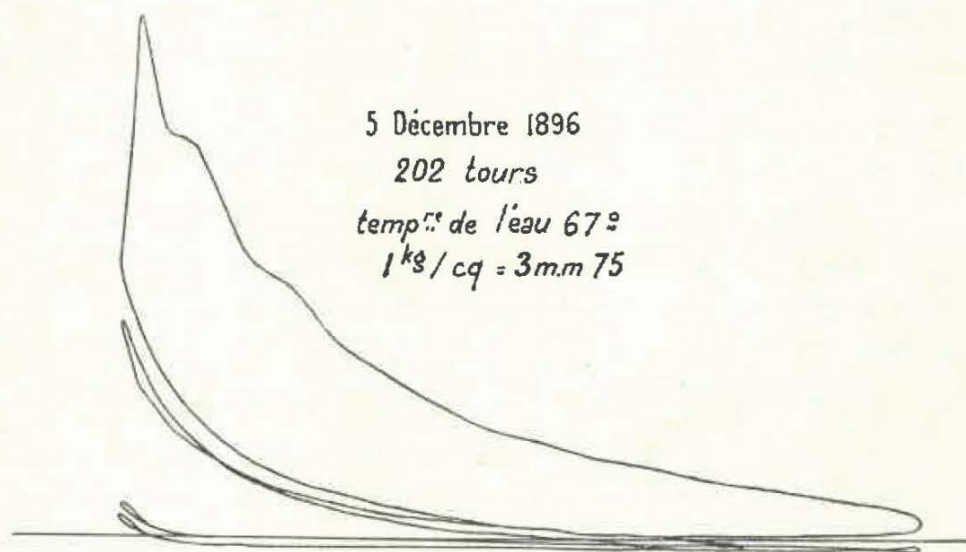


Fig. 14.

A. Nous avons établi que la production de gaz combustible d'un haut fourneau peut, dans les conditions normales, être évaluée de 5500 à 5800 kgs par tonne de fonte, soit en moyenne 5750 kgs ou 4300 mètres cubes de gaz sec et ramené à 15°. Un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour fournit donc moyennement près de 18000 mètres cubes de gaz combustibles par heure.

B. En admettant que la moitié de ce volume soit absorbée par le chauffage du vent soufflé, il reste 9000 mètres cubes disponibles pour la production de la force motrice. Adop-
tons pour le pouvoir calorifique de ces gaz la valeur de 1000

calories, chiffre établi à la fois par le calcul et par l'essai calorimétrique; admettons, d'autre part, que les moteurs à gaz utilisent au moins 20 % de la chaleur développée par l'explosion, comme cela résulte des expériences que nous avons rapportées et qui ont été faites par des expérimentateurs absolument dignes de foi, sur des moteurs de puissance relativement faible. Nous trouvons ainsi qu'un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour permettrait d'obtenir une puissance indiquée de près de 3000 chevaux, c'est-à-dire du triple au décuple de ce qu'on obtient aujourd'hui, suivant le système et l'état des

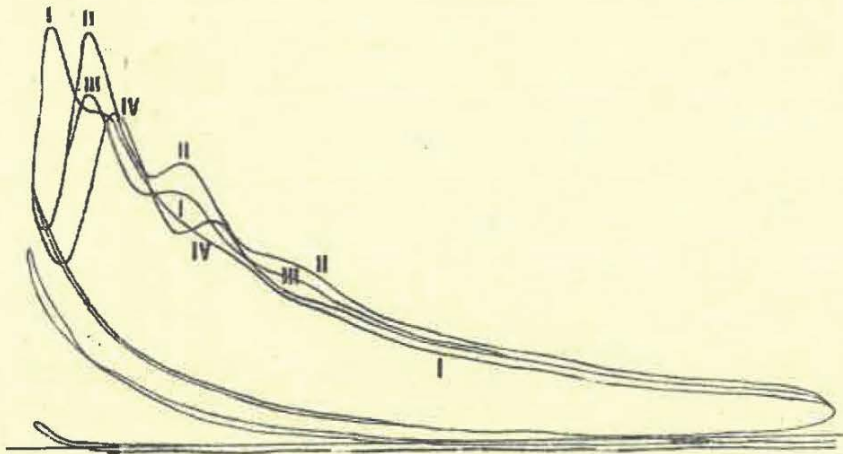


Fig. 15.

machines et des chaudières, en utilisant ces gaz pour produire de la vapeur.

C. L'expérience faite sur le moteur installé à l'atelier des hauts fourneaux de la société Cockerill depuis un an montre que ce moteur fonctionne parfaitement dans les conditions pratiques de marche des fourneaux, c'est-à-dire malgré les variations inévitables de composition et de pression des gaz.

Pour un moteur de cette puissance, ne marchant pas

même à pleine charge, la dépense moyenne peut être évaluée à 5 mètres cubes par cheval utile et par heure. Elle pourrait très probablement être abaissée en dessous de 4 mètres cubes dans un moteur de grande puissance fonctionnant à pleine charge ⁽¹⁾. Mais en conservant même le chiffre de 5 mètres cubes, nous trouvons encore un travail utile disponible de 1800 chevaux. Le service du fourneau en absorberait environ 400. Il resterait donc, même dans ces conditions qui sont en dessous de la réalité, une puissance utilisable de 1400 chevaux permettant d'activer, par fourneau de 100 tonnes, une usine importante annexée à ce fourneau.

D. La possibilité de construire des moteurs à gaz de grande puissance fonctionnant au moyen de gaz pauvres est aujourd'hui hors de doute. Rappelons que le moteur Simplex à cylindre unique des moulins de Pantin développe une puissance utile de 250 chevaux. Ce moteur ne fait que 100 tours par minute et pourrait marcher à une vitesse beaucoup plus faible. En accouplant deux de ces moteurs, on obtiendrait une puissance utile de 500 chevaux largement suffisante pour activer la machine soufflante d'un de nos grands hauts fourneaux modernes, même en tenant compte de la perte qui pourrait résulter de la transmission nécessaire pour réduire la vitesse.

E. L'utilisation directe des gaz dans les moteurs aurait l'avantage de supprimer la batterie de chaudières qu'exige le système actuellement employé pour la production de la force motrice; elle réduirait donc sensiblement les frais d'installation des hauts fourneaux. Elle mettrait en outre à la disposition de l'industrie une quantité considérable de

(1) La dépense d'un moteur à gaz fonctionnant à demi-charge est généralement supérieure d'environ 25 % à celle de la charge pleine. Voir les essais déjà cités de Kennedy, Hopkinson et Beauchamp Tower, et ceux de M. D. Monnier, sur le moteur Ravel. (Mémoire cité page 243.)

gaz combustibles. Ceux-ci étant à peu près à la pression atmosphérique et à la température de l'air après leur passage par les appareils laveurs, pourraient être distribués facilement à grande distance, sans perte de charge importante dans les conduites. Ils pourraient donc être employés soit au chauffage dans diverses opérations de fabrication, soit pour la production de la force motrice dans différentes parties de l'usine. L'expérience faite aux établissements Cockerill a montré, en effet, qu'ils peuvent être utilisés même pour des moteurs de faible puissance.

F. La consommation d'eau nécessaire au lavage du gaz et au refroidissement des moteurs ne peut être un obstacle à leur emploi. Une bonne machine à condensation consomme au moins 200 litres d'eau par cheval et par heure. Or, la dépense d'eau du grand moteur de Pantin n'atteint pas, au total, 40 litres, dont 28 environ pour le refroidissement du moteur et 12 pour le lavage du gaz. En admettant même, comme cela semble résulter des chiffres cités plus haut, que la dépense d'eau dût être sensiblement augmentée pour le lavage des gaz des fourneaux, qu'il faut débarrasser de leurs poussières, on pourrait probablement arriver à ne pas dépasser la consommation des machines à vapeur.

G. Pour les usines qui comprennent, à côté des hauts fourneaux, des aciéries, des laminoirs, des forges, des ateliers de construction, l'utilisation des gaz dans les moteurs fournirait gratuitement une force probablement supérieure à leurs besoins et leur permettrait de supprimer presque complètement leurs chaudières fixes. Celles qui ne se livrent qu'à la fabrication de la fonte pourraient distribuer le gaz aux environs et devenir ainsi des centres de production d'énergie analogues aux installations hydrauliques de Bellegarde ou du Niagara.

Nous rencontrerons, en terminant, une objection que l'on

pourrait faire au procédé d'utilisation que nous venons d'étudier : c'est la difficulté qui se présenterait, au moment de la mise à feu d'un haut fourneau, pour activer la soufflerie avant que l'appareil produise les gaz nécessaires au fonctionnement des moteurs. Mais cette difficulté n'est pas importante. De même que les chaudières où l'on brûle aujourd'hui les gaz doivent être munies de toqueries pour le cas où ceux-ci ne suffisent pas, on pourrait construire un gazogène permettant de faire marcher les machines soufflantes dans les premiers temps et destiné à servir d'appareil de secours pour les cas où des troubles survenant dans la conduite du fourneau diminueraient la quantité de gaz disponibles ou empêcheraient même d'utiliser ceux-ci pour la marche des moteurs. La dépense en charbon nécessitée ainsi pour la mise en train ne serait pas considérable, car les gaz que produit le haut fourneau dans les premiers temps de la mise à feu, deviennent rapidement très riches.

Quoi qu'il en soit, l'économie à réaliser pendant la marche régulière des fourneaux est assez considérable pour justifier cette installation, en somme peu coûteuse. Aussi sommes-nous persuadé que l'on ne tardera pas à s'engager complètement dans la voie où la société Cockerill est entrée et l'on peut espérer voir marcher bientôt la première machine soufflante à gaz.

Liège, février 1897.
